下载APP

14 | Java JIT编译器（二）：Sea of Nodes为何如此强大？

2020-07-03 宫文学

编译原理实战课 进入课程 >

讲述：宫文学
时长 17:52 大小 16.37M

你好，我是宫文学。这一讲，我们继续来研究 Graal 编译器，重点来了解一下它的 IR 的设计。

在上一讲中，我们发现 Graal 在执行过程中，创建了一个图的数据结构，这个数据结构就是 Graal 的 IR。之后的很多处理和优化算法，都是基于这个 IR 的。可以说，这个 IR 是 Graal 编译器的核心特性之一。

那么，为什么这个 IR 采用的是图结构？它有什么特点和优点？编译器的优化算法又是如何基于这个 IR 来运行的呢？

今天，我就带你一起来攻破以上这些问题。在揭晓问题答案的过程中，你对真实编译器中 IR 的设计和优化处理过程，也就能获得直观的认识了。

基于图的 IR

IR 对于编译器非常重要，因为它填补了高级语言和机器语言在语义上的巨大差别。比如说，你在高级语言中是使用一个数组，而翻译成最高效的 x86 机器码，是用间接寻址的方式，去访问一块连续的内存。所以 IR 的设计必须有利于实现这种转换，并且还要有利于运行优化算法，使得生成的代码更加高效。

在上一讲中，通过跟踪 Graal 编译器的执行过程，我们会发现它在一开始，就把字节码翻译成了一种新的 IR，这个 IR 是用图的结构来表示的。那这个图长什么样子呢？非常幸运的是，我们可以用工具来直观地看到它的结构。

你可以从 Oracle 的网站上，下载一个 **idealgraphvisualizer** 的工具。下载之后，解压缩，并运行它：

复制代码

```
export PATH="/<上级目录>/idealgraphvisualizer/bin:$PATH"
idealgraphvisualizer &
```

这时，程序会启动一个图形界面，并在 4445 端口上等待 GraalVM 发送数据过来。

接着，还是运行 Foo 示例程序，不过这次你要增加一个参数“-Dgraal.Dump”，这会让 GraalVM 输出编译过程的一些中间结果。并且在这个示例程序当中，我还增加了一个“-Xcomp”参数，它能让 JIT 编译器在第一次使用某个方法的时候，就去做编译工作。

复制代码

```
mx vm \
  -XX:+UnlockExperimentalVMOptions \
  -XX:+EnableJVMCI \
  -XX:+UseJVMCICompiler \
  -XX:-TieredCompilation \
  -XX:CompileOnly=Foo \
  -Dgraal.Dump \
  -Xcomp \
Foo
```

GraalVM 会在终端输出“`Connected to the IGV on 127.0.0.1:4445`”，这表明它连接上了 idealgraphvisualizer。接着，在即时编译之后，idealgraphvisualizer 就接收到了编译过程中生成的图，你可以点击显示它。

这里我展示了其中两个阶段的图，一个是刚解析完字节码之后（After parsing），一个是在处理完中间层之后（After mid tier）。

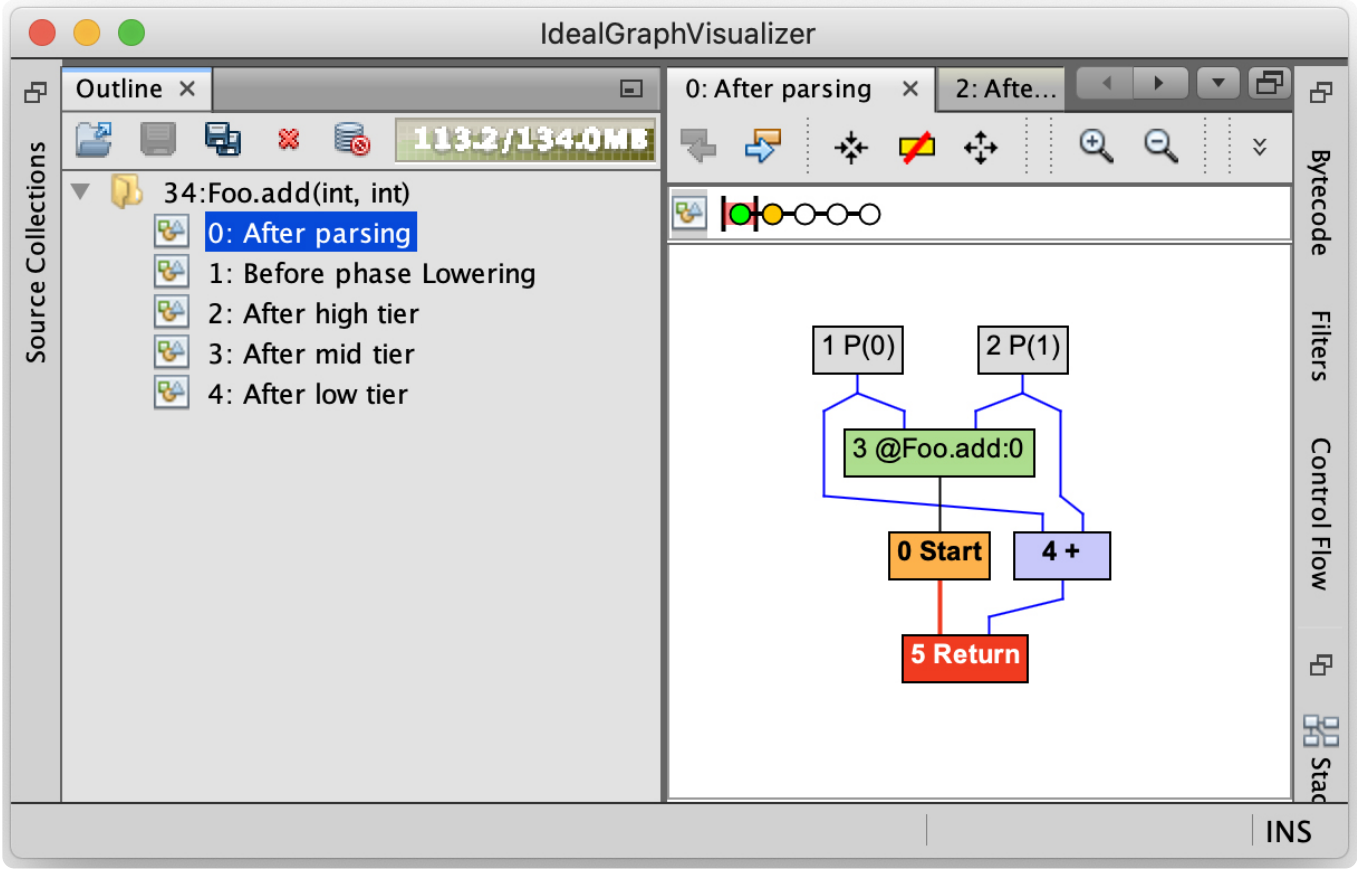


图 1：After parsing

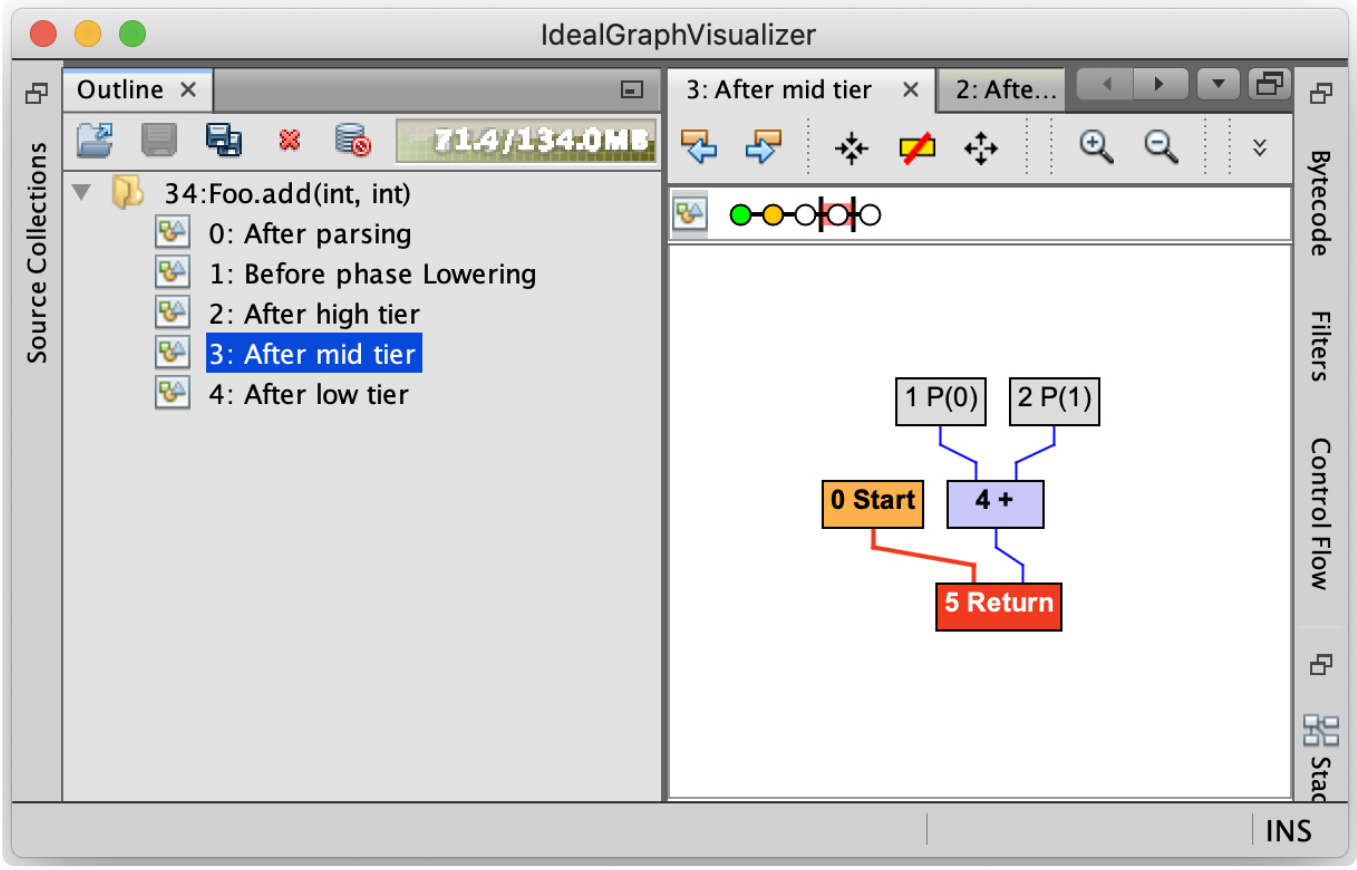


图 2：After mid tier

Graal IR 其实受到了“程序依赖图”的影响。我们在第 6 讲中提到过程序依赖图（PDG），它是用图来表示程序中的数据依赖和控制依赖。并且你也知道了，这种 IR 还有一个别名，叫做**节点之海（Sea of Nodes）**。因为当程序稍微复杂一点以后，图里的节点就会变得非常多，我们用肉眼很难看得清。

基于 Sea of Nodes 的 IR 呢，算是后起之秀。在 HotSpot 的编译器中，就采用了这种 IR，而且现在 Java 的 Graal 编译器和 JavaScript 的 V8 编译器中的 IR 的设计，都是基于了 Sea of Nodes 结构，所以我们必须重视它。

这也不禁让我们感到好奇了：**Sea of Nodes 到底强在哪里？**

我们都知道，数据结构的设计对于算法来说至关重要。IR 的数据结构，会影响到算法的编写方式。好的 IR 的设计，会让优化算法的编写和维护都更加容易。

而 Sea of Nodes 最大的优点，就是能够用一个数据结构同时反映控制流和数据流，并且尽量减少它们之间的互相依赖。

怎么理解这个优点呢？在传统的编译器里，控制流和数据流是分开的。控制流是用控制流图（Control-flow Graph，CFG）来表示的，比如 GNU 的编译器、LLVM，都是基于控制流图的。而 IR 本身，则侧重于表达数据流。

以 LLVM 为例，它采用了 SSA 格式的 IR，这种 IR 可以很好地体现值的定义和使用关系，从而很好地刻画了数据流。

而问题在于，采用这种比较传统的方式，控制流和数据流会耦合得比较紧，因为 IR 指令必须归属于某个基本块。

举个例子来说明一下吧。在下面的示例程序中，“`int b = a*2;`”这个语句，会被放到循环体的基本块中。

复制代码

```
int foo(int a){
    int sum = 0;
    for(int i = 0; i< 10; i++){
        int b = a*2;    //这一句可以提到外面
        sum += b;
    }
}
```

可是，从数据流的角度看，变量 b 只依赖于 a。所以这个语句没必要放在循环体内，而是可以提到外面。在传统的编译器中，这一步是要分析出循环无关的变量，然后再把这条语句提出去。而如果采用 Sea of Nodes 的数据结构，变量 b 一开始根本没有归属到特定的基本块，所以也就没有必要专门去做代码的移动了。

另外，我们之前讲本地优化和全局优化的时候，也提到过，它们的区别就是，在整个函数范围内，优化的范围是在基本块内还是会跨基本块。而 Sea of Nodes 没有过于受到基本块的束缚，因此也就更容易做全局优化了。

好，那在概要地理解了 Graal IR 的数据结构之后，接下来，我们就具体了解一下 Graal IR，包括认识一下数据流与控制流的特点，了解两种不同的节点：浮动节点和固定节点，以及认识一种特殊的节点：FrameState。

数据流和控制流

我们已经知道，Graal IR 整合了两种图结构：数据流图和控制流图。

首先，我们来看看它的数据流。

在下图中，蓝色的边代表的是数据流，也就是数据之间的依赖关系。参数 1（“P(0)”节点）和参数 2（“P(1)”节点）的值流入到 + 号节点，再流入到 Return 节点。

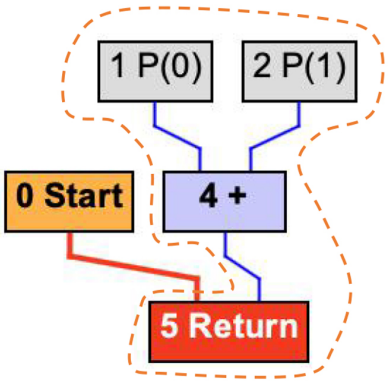


图 3：Foo.add() 的数据流

在 Graal IR 的设计中，Add 节点有两个输入，分别是 x 和 y，这两个输入是 AddNode 的两个属性。**注意**，这个图中的箭头方向代表的是**数据依赖关系**，也就是 Add 节点保持着对它的两个输入节点的引用，这其实跟 AST 是一致的。**而数据流向，则是反过来的**，从 x 和 y 流向 Add 节点。

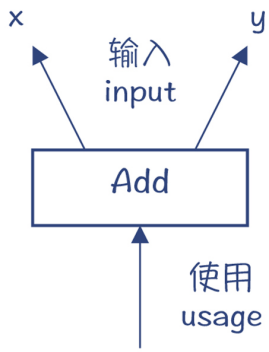


图 4：Add 节点的数据依赖关系

查看 AddNode 的设计，你会发现其父类中有两个成员变量，x 和 y。它们用 @input 做了注解，这就意味着，这两个成员变量代表的是数据流图中的两条边。

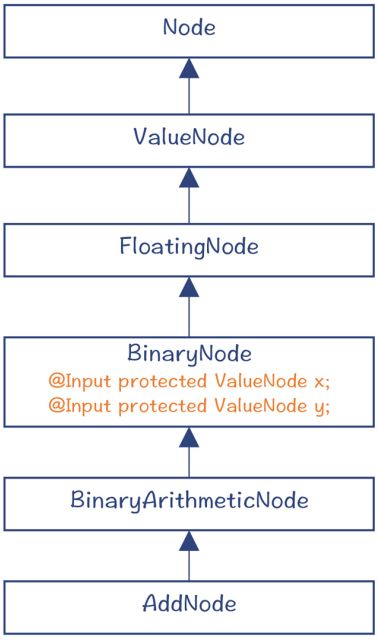


图 5：Add 节点及其各级父节点

另外，Graal IR 的数据流图是符合 SSA 格式的。也就是说，每个节点代表了 SSA 中的一个值，它只被定义一次，也就相当于 SSA 中的每个变量只被赋值一次。

我们再来看看控制流。

下图中，红色的边代表的是控制流，控制流图代表的是程序执行方向的改变。进入或退出一个函数、条件分支语句、循环语句等，都会导致程序的执行从一个地方跳到另一个地方。

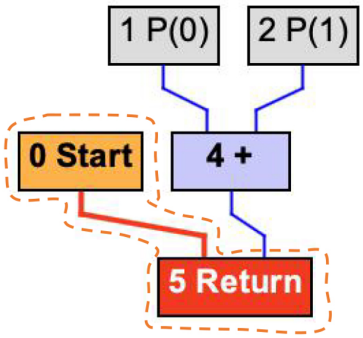


图 6：Foo.add() 的控制流

数据流加上控制流，就能完整表达程序的含义，它等价于字节码，也等价于更早期的 AST。你可以从 Start 节点，沿着控制流遍历这个图。当到达 Return 节点之前，Return

所依赖的数据（x+y）也需要计算出来。

add() 方法的控制流很简单，只有 Start 和 Return 两个节点。我们做一个稍微复杂一点的例子，在 Foo.add2() 示例程序中，调用两个函数 getX() 和 getY()，分别获取 x 和 y 成员变量。

复制代码

```
public int add2(){
    return getX() + getY();
}
```

对应的 Graal 图如下。它增加了两个节点，分别是调用方法 getX 和 getY，这就导致了控制流发生变化。

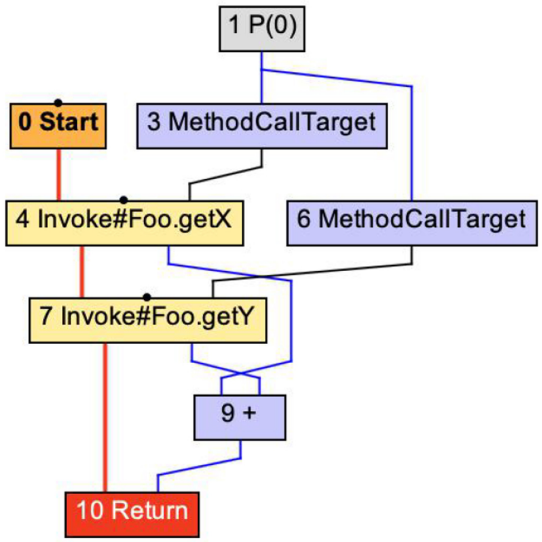


图 7：Foo.add2() 对应的 IR

注意：对于这个例子，在使用 GraalVM 时，要使用 -XX:-Inline 选项，避免编译器做内联优化，否则 Foo.getX() 和 Foo.getY() 会被内联。我们在下一讲中就会探讨内联优化。

除了调用其他函数，if 语句、循环语句等，也会导致控制流的变化。我们看看这个例子：

复制代码

```
public int doif(int x, int y){
    int z;
    if (x < 2)
```

```
4           z=x+y;
5       else
6           z=x*y;
7       return z;
8   }
```

它对应的 Graal 图如下，if 语句会让控制流产生分支，分别对应 if 块和 else 块，最后在 Merge 节点合并起来。

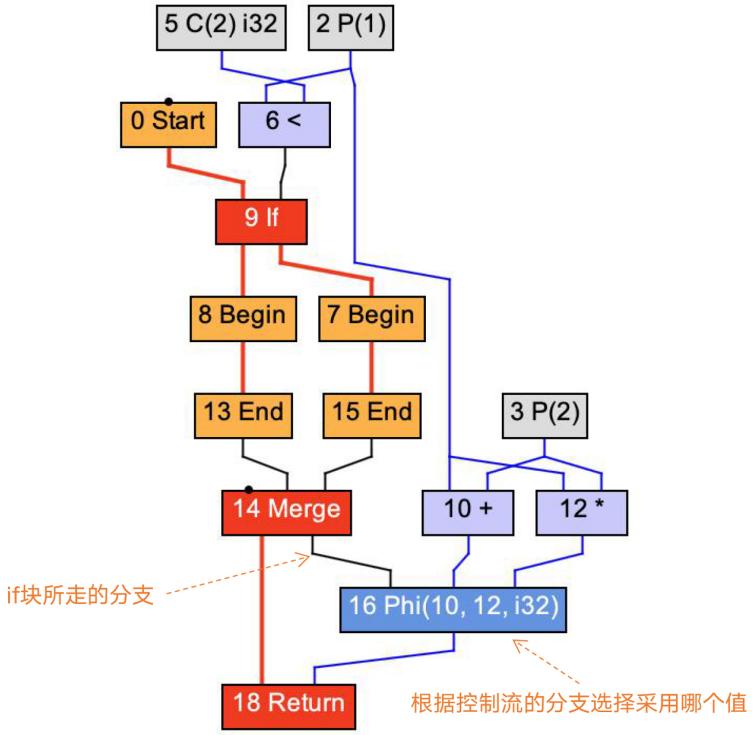


图 8：doif() 方法对应的 IR

IfNode 作为一种控制流节点，它保存着对下级节点的引用，并用 @Successor 注解来标注。这意味着 trueSuccessor 和 falseSuccessor 两个成员变量，代表着控制流中的两条边。当然，你也会注意到，If 节点有一个数据流的输入，这就是 If 的判断条件。IR 会基于这个判断条件，来决定控制流的走向。

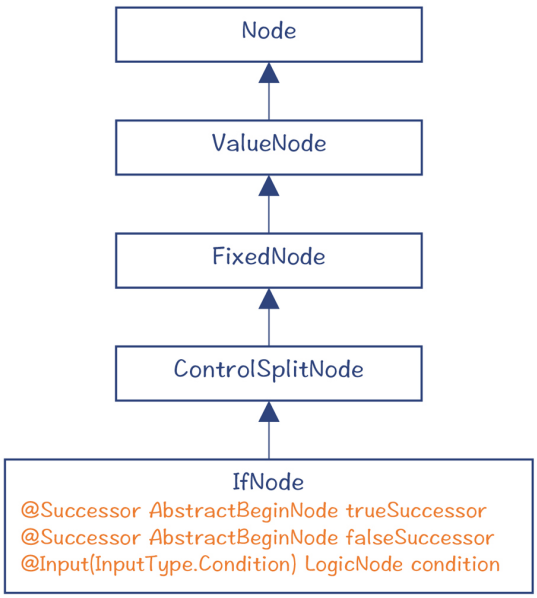


图 9：IfNode 及其各级父节点

跟控制流类似，数据流也产生了两个分支，分别是x+y和x*y。最后用一个 Phi 节点合并到一起。

Phi 节点是 SSA 的一个特性。在 doif 示例程序中，z 可能有两个取值。如果控制流走的是 if 块，那么z=x+y；而如果走的是 else 块，则z=x*y。Phi 节点就起到这个作用，它根据控制流来选择值。

总结一下：控制流图表达的是控制的流转，而数据流图代表的是数据之间的依赖关系。二者双剑合璧，代表了源程序完整的语义。

接下来，我再给你介绍一下浮动节点和固定节点的概念。

浮动节点和固定节点

注意，在 Graal IR，数据流与控制流是相对独立的。你看看前面的 doif 示例程序，会发现x+y和x*y的计算，与 if 语句的控制流没有直接关系。所以，你其实可以把这两个语句挪到 if 语句外面去执行，也不影响程序运行的结果（要引入两个临时变量 z1 和 z2，分别代表 z 的两个取值）。

对于这些在执行时间上具有灵活性的节点，我们说它们是浮动的（Floating）。你在 AddNode 的继承层次中，可以看到一个父类：FloatingNode，这说明这个节点是浮动

的。它可以在最后生成机器码（或 LIR）的环节，再去确定到底归属哪个基本块。

除了浮动节点以外，还有一些节点是固定在控制流中的，前后顺序不能乱，这些节点叫做固定节点。除了那些流程控制类的节点（如 IfNode）以外，还有一些节点是固定节点，比如内存访问的节点。当你访问一个对象的属性时，就需要访问内存。

内存是个共享资源，同一个内存地址（比如对象的属性），可以被多次读写。也就是说，内存位置不是 SSA 中的值，所以也不受单赋值的约束。

对同一个内存地址的读写操作，顺序是不能乱的。比如下面代码中，第二行和第三行的顺序是不能变的，它们被固定在了控制流中。

复制代码

```
1 x := 10
2 store x to 地址a
3 y := load 地址a
4 z := y + 10
```

不过，在运行某些优化算法的时候，某些固定节点会被转化成浮动节点，从而提供了更大的代码优化空间。我们在下一讲的“内联和逃逸分析”中，会见到这样的例子。

FrameState 节点

在看 Graal IR 的时候，你经常会遇到一个绿色的节点插在图中。为避免你产生困惑，接下来我就专门给你解释一下这个节点，我们一起来认识一下它。

在 Foo.add() 新生成的 IR 中，如果你不勾选“Remove State”选项，就会显示出一个绿色的节点。这个节点就是 FrameState 节点。

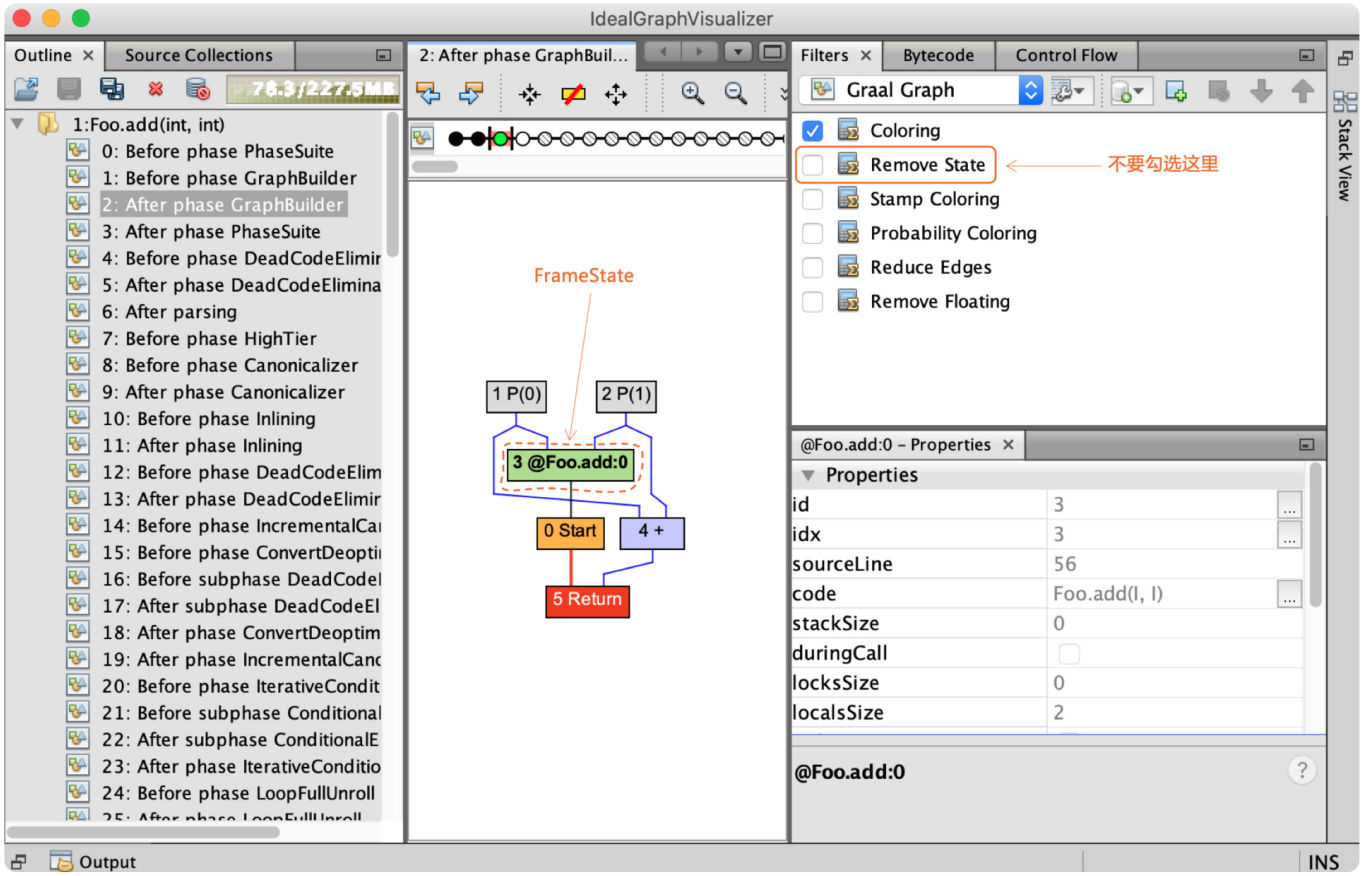


图 10：Foo.add() 中的 FrameState 节点

FrameState 比较特殊。它保存了栈帧的状态，而且这里我指的是 Java 字节码解释器的栈帧的状态，包括了本地变量和操作数栈里的值。

为什么要保存栈帧的状态呢？

第一个用途，是用于逆优化。上一讲我们说过，编译器有时候会基于推测做一些激进的优化，比如忽略掉某些分支。但如果推测依据的前提错了，那么就要做逆优化，重新回到解释器去执行。而 FrameState 的作用就是在代码中一些叫做安全点的地方，记录下栈帧的状态，便于逆优化以后，在解释器里去接着执行程序。

第二个用途，是用于 debug。编译器会用 FrameState，来记录程序执行的一些中间状态值，以方便程序的调试。

对于 Foo.add() 方法的 IR，通过后面的一些优化处理，你会发现 Foo.add() 并不需要逆优化，那么 FrameState 节点就会被去掉。否则，FrameState 就会转化成一个逆优化节点，生成与逆优化有关的代码。

如果你并不关心逆优化，那你在平常看 IR 的过程中，可以勾选“Remove State”选项，不用关注 FrameState 节点就行了。

好了，我们已经大致了解了 Graal IR。进一步，编译器要基于 IR 做各种处理和优化。

对 Graal IR 的处理和优化

通过上一讲，我们已经知道在编译过程中要对图进行很多遍的处理。还是以 Foo.add() 示例程序为例，在运行 GraalVM 的时候，我们加上“-Dgraal.Dump=:5”选项，程序就会详细地 dump 出所做的处理步骤，你可以在 idealgraphvisualizer 中看到这些处理环节，点击每个环节可以看到相对应的 IR 图。

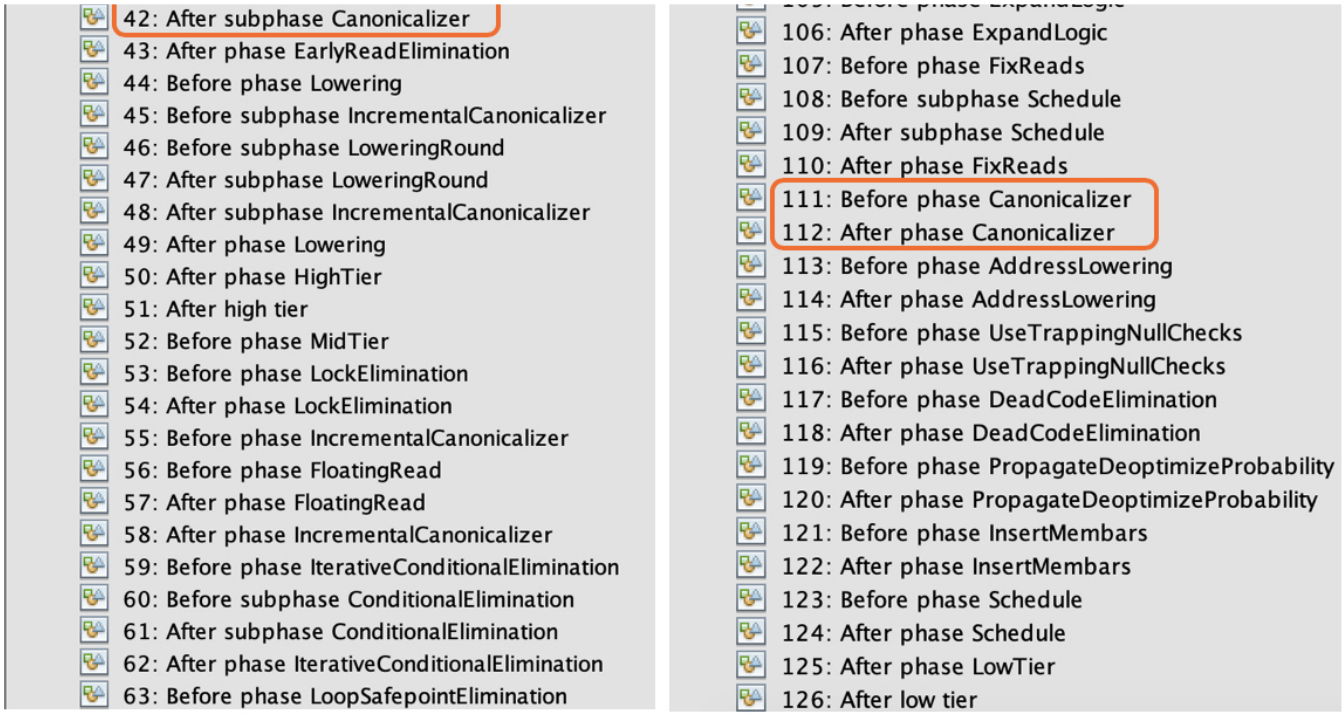


图 11：对 Foo.add() 所做的处理

在这些处理阶段的名称中，你会看到我们在第 7 讲中提到的一些代码优化算法的名称（如死代码删除）。有了前面课程的铺垫，你现在看它们应该就消除了一些陌生感。

另外，你会发现，在这些处理阶段中，有一个 Canonicalizer 的阶段出现了好几次，并且你可能对这个词也比较陌生，所以下面我们不妨来看看，这个阶段都做了些什么。

规范化（Canonicalizer）

Canonicalize 的意思是规范化。如果某段程序有多种写法，那么编译器会处理成一种统一的、标准的写法。

比如，对于下面这个简单的函数，它是把 a 乘以 2。在 CanonicalizerPhase 运行之后，乘法运算被替换成了移位运算，也就是a<<1。它的效果与乘以 2 是相同的，但运行效率更高。

复制代码

```
public int doDouble(int a){
    return 2*a;
}
```

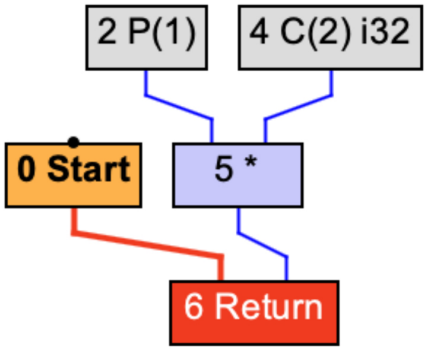


图 12：未做规范化优化之前，是乘法运算

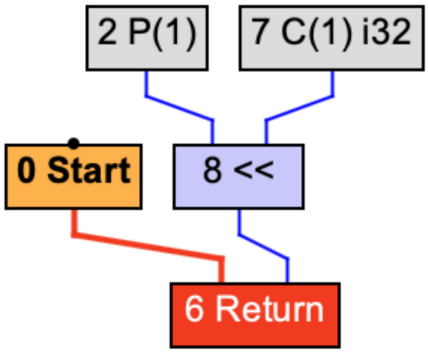


图 13：做完规范化优化之后，变成移位运算

你还可以试一下对某个变量取两次负号的操作。在规范化阶段以后，两个负号就会被去掉，直接返回 a。

复制代码

```
public int negneg(int a){
  return -(-a);
}
```

规范化需要的操作，都是对本节点进行修改和替换，一般都不太复杂。某节点如果实现了 Canonicalizable 接口，在 CanonicalizerPhase 就会对它做规范化。

在规范化阶段实现的优化算法包括：常数折叠（Constant Folding）、强度折减（Strength reduction）、全局值编号（Global Value Numbering，GVN），等等。它们的原理，我在第 7 讲都介绍过，这里就不赘述了。

课程小结

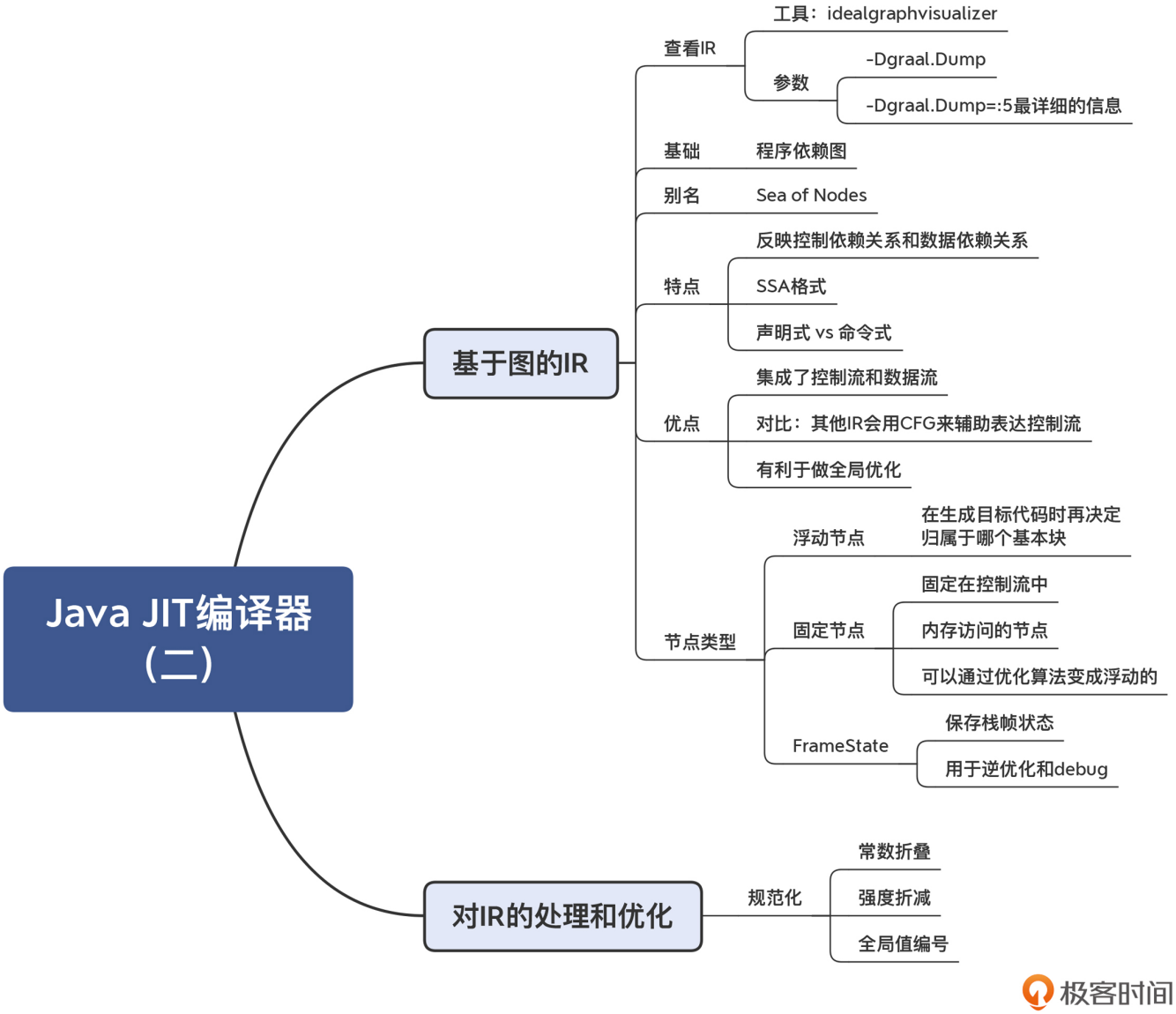
这一讲，我给你介绍了 Graal 的 IR：它整合了控制流图与数据流图，符合 SSA 格式，有利于优化算法的编写和维护。

我还带你了解了对 IR 的一个优化处理过程：规范化。规范化所需要的操作一般并不复杂，它都是对本节点进行修改和替换。在下一讲中，我会带你分析另外两个重要的算法，内联和逃逸分析。

另外，Graal 的 IR 格式是声明式的（Declarative），它通过描述一个节点及其之间的关系来反映源代码的语义。而我们之前见到的类似三地址代码那样的格式，是命令式的（Imperative），它的风格是通过命令直接告诉计算机，来做一个个的动作。

声明式和命令式是编程的两种风格，在 Graal 编译器里，我们可以看到声明式的 IR 会更加简洁，对概念的表达也更加清晰。我们在后面介绍 MySQL 编译器的实现机制当中，在讲 DSL 的时候，还会再回到这两个概念，到时你还会有更加深刻的认识。

本讲的思维导图我也放在了这里，供你参考：



一课一思

了解了 Graal IR 的特点以后，通过对比我们在第 7 讲中学过的优化算法，你觉得哪些优化算法在 Graal IR 上实现起来会更方便？为什么？欢迎在留言区分享你的看法。

如果你觉得有收获，也欢迎你把今天的内容分享给更多的朋友。

参考资料

基于图的 IR，有三篇论文必须提到：

1. 程序依赖图：J. Ferrante, K. J. Ottenstein, and J. D. Warren. The program dependence graph and its use in optimization. July 1987。有关程序依赖图的概念在 1987 年就提出来了。

2. Click 的论文：A Simple Graph-Based Intermediate Representation。这篇文章比较易读，属于必读文献。Click 还发表了一些论文，讲述了基于图的 IR 上的优化算法。
3. 介绍 Graal IR 的论文：Graal IR: An Extensible Declarative Intermediate Representation。这篇论文也很易读，建议你一定要读一下。

提建议

© 版权归极客邦科技所有，未经许可不得传播售卖。 页面已增加防盗追踪，如有侵权极客邦将依法追究其法律责任。

上一篇 13 | Java JIT编译器（一）：动手修改Graal编译器

下一篇 15 | Java JIT编译器（三）：探究内联和逃逸分析的算法原理

精选留言 (2)

写留言

leaf
2020-07-05

老师会讲一下从字节码到graal ir的生成过程吗？

展开

作者回复: 在第16讲有所提及

wusiration
2020-07-04

指令排序以及缓存优化，这两种优化方法需要分析出代码控制依赖和数据依赖的关系。

作者回复: Great！